

EVALUACION Y COMPARACION DE METODOS DE MEDICION CONSUMO DE COMBUSTIBLE PARA LABORATORIO Y RUTA EN UN VEHICULO LIVIANO

TRABAJO DE GRADO

OLIVIER NUNIGE

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
PEREIRA 2018**

EVALUACION Y COMPARACION DE METODOS DE MEDICION CONSUMO DE COMBUSTIBLE PARA LABORATORIO Y RUTA EN UN VEHICULO LIVIANO

OLIVIER NUNIGE

TRABAJO DE GRADO

**DIRECTOR:
JUAN CARLOS CASTILLO HERRERA, IM.**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
PEREIRA 2018**

Tabla de contenido

RESUMEN	1
CAPÍTULO 1: DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	2
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.2 JUSTIFICACIÓN	3
1.3 OBJETIVOS	4
1.3.1 Objetivo General	4
1.3.2 Objetivos Específicos	4
1.4 APOORTE AL CAMPO DEL CONOCIMIENTO	4
1.5 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	5
1.5.1 Consumo de combustible	5
1.5.2 Etiquetado de vehículos	5
CAPÍTULO 2: MEDICIÓN CONSUMO DE COMBUSTIBLE	7
2.1 MÉTODOS DE MEDICIÓN	7
2.1.1 Método gravimétrico	7
2.1.2 Método volumétrico	8
2.1.3 Método del balance de carbono	9
2.2 PROCEDIMIENTO DE PRUEBA PARA MÉTODOS GRAVIMÉTRICO Y VOLUMÉTRICO	10
2.2.1 Prueba de laboratorio	10
2.2.2 Prueba de ruta	11
2.3 NORMAS DE CICLOS DE CONDUCCIÓN	12
2.3.1 NEDC	13
2.3.2 FTP75	13
2.3.3 WLTP	14
2.3.5 Ciclo Pereira	15
CAPÍTULO 3 COMPARACIÓN DE MÉTODOS	16
3.1 MÉTODO DE ANÁLISIS DE LOS DATOS	16
3.1.1 Pruebas de laboratorio	16
3.1.2 Pruebas de ruta	17
3.2 MÉTODO DE ANÁLISIS DE LA INCERTIDUMBRE	17
3.2.1 Pruebas de laboratorio	18

3.2.2 Pruebas de ruta	19
3.2.3 Coeficientes de sensibilidad	19
3.2.4 Incertidumbre estimada asociada a cada entrada	20
3.2.5 Varianza estimada por repetibilidad.....	21
3.2.6 Incertidumbre expandida.....	21
3.2.7 Coeficiente de variación CV	22
3.3 ANÁLISIS DE DATOS Y DE LA INCERTIDUMBRE	22
3.3.1 Ciclo FTP-75	22
3.3.2 Ciclo WLTC	24
3.3.3 Ciclo Pereira en laboratorio.....	25
3.3.4 Ciclo Pereira en ruta.....	26
3.4 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS	28
3.4.1 Métodos de medición	28
3.4.2 Procedimiento de prueba.....	29
3.4.3 Ciclos de conducción	30
CONCLUSIONES.....	31
BIBLIOGRAFÍA	33

Lista de figuras

figura 1: procedimiento de laboratorio	11
figura 2: procedimiento de ruta	12
figura 3: perfil NEDC	13
figura 4: perfil FTP-75.....	14
figura 5: perfil WLTC.....	14
figura 6: perfil Pereira laboratorio	15

Lista de tablas

tabla 1: datos gravimétricos FTP-75.....	22
tabla 2: resultados gravimétricos FTP-75	23
tabla 3: datos volumétricos FTP-75.....	23
tabla 4: resultados volumétricos FTP-75	23
tabla 5: datos gravimétricos WLTC.....	24
tabla 6: resultados gravimétricos WLTC.....	24
tabla 7: datos volumétricos WLTC.....	25
tabla 8: resultados volumétricos WLTC	25
tabla 9: datos gravimétricos Pereira en laboratorio	25
tabla 10: resultados gravimétricos Pereira en laboratorio	26
tabla 11: datos volumétricos Pereira en laboratorio	26
tabla 12: resultados volumétricos Pereira en laboratorio.....	26
tabla 13: datos gravimétricos Pereira en ruta.....	27
tabla 14: resultados gravimétricos Pereira en ruta.....	27
tabla 15: datos volumétricos Pereira en ruta.....	27
tabla 16: resultados volumétricos Pereira en ruta	28
tabla 17: consumo y coeficiente de variación de las pruebas	28

Lista de símbolos

C: consumo del vehículo (km/L)
 N: número de vueltas del rodillo del dinamómetro
 d: diámetro del rodillo (m)
 ρ_c : densidad del combustible (kg/m³)
 m_c : masa de combustible (kg)
 V_c : volumen de combustible (L)
 D: distancia recorrida (km)
 T: temperatura del ambiente (K)
 P: presión atmosférica (Pa)
 h: humedad relativa del aire (%Hr)
 t: tiempo (s)
 Q(t): caudal registrado por el medidor al momento t (mL/s)

RESUMEN

La medición consumo de combustible tiene por objetivo evaluar el rendimiento de los vehículos con el fin de informar al consumidor cual costo de operación e impacto ambiental tiene cada vehículo y de definir normas de consumo al nivel estatal. En el trabajo de grado presente, la medición se apoya sobre normas colombianas desarrolladas a partir de reglamentaciones estadounidenses y europeas. La medición se realiza con el método gravimétrico, volumétrico o de balance de carbono según las necesidades.

El objetivo principal del trabajo presente es la comparación de los métodos gravimétricos y volumétricos en el Laboratorio de Pruebas Dinámicas Automotrices de la Universidad Tecnológica de Pereira sobre un Chevrolet Aveo 1.6L. Se evalúa el consumo bajo pruebas de laboratorio mediante la aplicación de los ciclos FTP-75 de Estados Unidos, WLTP de Europa y un ciclo desarrollado para las especificidades de Pereira. Este último ciclo se adapta para pruebas ruta con el fin de recolectar datos comparables a un recorrido real.

Se presentan los métodos de medición de combustible, el procedimiento de las pruebas de ruta y de laboratorio y los ciclos utilizados. Además, se analizan los datos de medición y se evalúa la incertidumbre de medición de cada método aplicado a los ciclos. Luego se verifica la conformidad de los resultados respecto a la metrología y por fin se determina cual método de medición consumo de combustible tiene mayor posibilidad de implementación y confiabilidad en el Laboratorio de Pruebas Dinámicas Automotrices de la Universidad Tecnológica de Pereira

CAPÍTULO 1: DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

En este capítulo, se presenta la descripción del procedimiento seguido para la solución del problema de investigación y de los objetivos establecidos. Del mismo modo, se analiza cómo contribuye la investigación al campo de la ingeniería, se presenta la organización del documento y se realiza una introducción teórica del tema de la medición de consumo de combustible.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En 2015, el consumo energético anual a nivel global estaba en 169 mil millones de kWh y según los modelos, va a crecer hasta 216 mil millones de kWh en el 2040. Por su parte, el sector del transporte consumía 19% de la demanda mundial en el 2015 y 55% de los combustibles líquidos [1]. Además, el consumo de combustibles fósiles tiene un impacto sobre el cambio climático, porque la combustión de gasolina o de Diesel produce dióxido de carbono, un gas responsable por el calentamiento global y que también presenta afecciones en la salud humana [2].

Debido a esto, es importante medir con precisión el consumo de combustible de los vehículos, mediante métodos adecuados, basados en las capacidades técnicas y tecnológicas de cada país. Para enfrentar estos dos retos, existen dos regulaciones colombianas, la resolución 910 de 2008 y la 1111 de 2013 [3] [4]. Pero estas dos reglamentaciones solamente restringen las emisiones de los vehículos, hacen mención de ciclos de conducción como la FTP-75 de Estados Unidos o el NEDC de Europa y posibles normativas a seguir para realizar la medición del consumo de combustible y emisiones, con el fin de realizar el proceso de homologación, sin embargo, no se especifica los protocolos de pruebas.

A nivel mundial, el método más utilizado es el del balance de carbono, y sirve para medir el consumo de combustible bajo diferentes ciclos de operación según la normativa ISO 3929 [5]. Este se compone de un tubo que recolecta los gases de escape acoplado a un centro de cálculo, este involucra que los laboratorios cumplan con parámetros tales como; acondicionamiento de aire, taller de revisión y verificación de vehículos, entre otros. El método volumétrico usa medidores de flujo diferencial para combustible y calcula el consumo de combustible como la diferencia entre el flujo inyectado y el retorno del combustible en el motor, para esto se debe tener en cuenta variables que influyan en las características y comportamiento del combustible durante las pruebas en ruta o laboratorio. Por su parte, el método gravimétrico necesita equipos de baja inversión tales como; balanza, termómetros, reguladores de presión, entre otros, además, sus protocolos de pruebas son muy utilizados en diferentes estudios [6].

Lo anterior, permite identificar que el método de balance de carbono tiene un costo de implementación demasiado alto y en Colombia aún no se cuenta con capacidades tecnológicas ni de infraestructura que permitan su implementación. Por lo tanto, en este proyecto de investigación se propone medir el consumo de combustible en un vehículo liviano mediante el método gravimétrico y volumétrico en el Laboratorio de Pruebas Dinámicas Automotrices y en una ruta específica, puesto que el Grupo de Investigación en

Gestión Energética, cuenta con equipos que permiten implementar los dos métodos mencionados.

Los resultados de consumo de combustible obtenidos mediante las dos metodologías serán evaluados metrológicamente para saber cuál presenta mayor incertidumbre en el cálculo y responder la pregunta que dio pie a realizar esta investigación: ¿Qué metodología de medición consumo de combustible es más confiable metrológicamente y cual tiene mayor viabilidad de implementación?

1.2 JUSTIFICACIÓN

La creciente demanda en consumo energético nos obliga a definir usos razonables de las energías fósiles. Sin embargo, el sector del transporte, mediante la combustión de gasolina y Diesel, es responsable por una gran parte de las emisiones de dióxido de carbono, que es un potente gas de efecto invernadero.

Al mismo tiempo, se desarrollan modelos para predecir el consumo de vehículos y evaluar el efecto de nuevas tecnologías [7]. Pero estos modelos necesitan bases de datos confiables con información actualizada y basada sobre pruebas reales. Hoy existen varios métodos de medición de consumo de combustible, pero no todos se pueden implementar en los laboratorios en Colombia, debido a las capacidades tecnológicas y de infraestructura. Por esa razón, este proyecto se concentra sobre los métodos gravimétrico y volumétrico para definir cuál es el más adaptado y confiable para pruebas colombianas.

El método gravimétrico consiste en determinar la cantidad proporcionada de carburante consumido pesando la variación de masa de combustible durante la prueba. Mediante el valor de los parámetros atmosféricos registrados durante la ejecución de la prueba se puede deducir el consumo del ensayo. Por otro lado, el método volumétrico consiste en medir el flujo de combustible gracias a una caja electrónica ubicada entre el tanque y el motor. Por último, el método del balance de carbono consiste en medir la cantidad de carbono que se encuentra en los gases de escape [8] [9].

Durante el desarrollo de este proyecto, se van a estudiar, evaluar y comparar ambos métodos de medición de combustible, teniendo en cuenta los parámetros efectivos. Lo anterior, se realizará mediante pruebas de laboratorio y de ruta en un vehículo liviano, así, analizar el efecto de parámetros que pueden variar durante los ensayos, tales como; la temperatura, la presión, la humedad, el tráfico entre otros. Estos ensayos se realizarán con base en las normativas colombianas, estadounidenses y europeas, con el fin de definir pruebas regulares que permitan su correcta ejecución.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General

Evaluar y comparar métodos de medición consumo de combustible para laboratorio y ruta en un vehículo liviano

1.3.2 Objetivos Específicos

- Identificar y analizar los métodos y procedimientos para la medición del consumo de combustible en vehículos livianos.
- Medir el consumo de combustible en un vehículo liviano mediante el método gravimétrico y volumétrico en laboratorio
- Medir el consumo de combustible en un vehículo liviano mediante el método gravimétrico y volumétrico en ruta
- Realizar un análisis comparativo en aspectos metrológicos y técnicos para las pruebas de laboratorio y ruta.

1.4 APOORTE AL CAMPO DEL CONOCIMIENTO

Desde los años 70, se desarrollaron ciclos de conducción para vehículos livianos, siguiendo las propuestas de varias investigaciones a nivel mundial. El objetivo de ese desarrollo fue construir una base de comparación del consumo de combustible y de las emisiones de los vehículos livianos. Hoy en día existen varios que responden a las necesidades particulares de la región de donde vienen. En efecto, la concepción de los carros, las leyes de conducción y el ambiente son parámetros que varían entre regiones del mundo [10].

En Colombia no se definió un ciclo particular pero la Resolución 910 del 2008 rige el transporte en el país [3] y está orientada a garantizar la seguridad y operatividad de un vehículo, y regula únicamente los niveles de Hidrocarburos (HC) y Monóxido de Carbono (CO) en los gases de escape, bajo protocolos de pruebas estáticas. Por eso se necesita definir una metodología adaptada a la medición consumo de combustible sobre vehículos livianos. Por lo tanto, con esta investigación se pudo comparar dos métodos de medición consumo de combustible que son el método gravimétrico y el método volumétrico. Se analizaron los dos métodos bajo pruebas dinámicas en ruta y en laboratorio sobre un vehículo liviano y con base en un análisis comparativo en aspectos metrológicos y técnicos de los métodos de medición determinó cuál método es más apto para la medición en el Laboratorio de Pruebas Dinámicas Automotrices y en ruta, considerando la incertidumbre de la medición y de facilidad de implementación.

1.5 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.5.1 Consumo de combustible

La economía de combustible de un automóvil es la relación entre la distancia recorrida y la cantidad de combustible consumida por el vehículo [11]. El consumo puede expresarse en términos de volumen de combustible para recorrer una distancia, o la distancia recorrida por unidad de volumen de combustible consumido. Dado que el consumo de combustible de los vehículos es un factor importante en la contaminación del aire, muchos países imponen requisitos para el ahorro de combustible además de definir estrategias de conducción eficiente [12]. Se usan diferentes métodos para aproximar el rendimiento real del vehículo. Se pueden emplear diversas estrategias para reducir las pérdidas en cada una de las conversiones entre la energía química en el combustible y la energía cinética del vehículo.

La economía de combustible se puede expresar de dos maneras:

Las unidades de combustible por distancia fija se expresan generalmente como litros por cada 100 kilómetros (L/100km), que se utilizan en la mayoría de los países europeos, China, Sudáfrica, Australia y Nueva Zelanda. Las leyes británica y canadiense permiten el uso de cualquiera de los litros por cada 100 kilómetros o millas por galón imperial. La etiqueta de los vehículos nuevos de EE. UU. ha comenzado a mostrar el consumo de combustible del vehículo en galones estadounidenses por cada 100 millas, además del número de millas por galón (MPG).

Las unidades de distancia por unidad de combustible fijas como MPG se usan comúnmente en los Estados Unidos, el Reino Unido y Canadá [13][14][15]. Kilómetros por litro (km/L) es más comúnmente utilizado en otras partes de las Américas, Europa continental, Asia, partes de África y Oceanía [16].

Ambos MPG y km/L son unidades de distancia por cantidad fija de combustible, el aumento del valor representa el rendimiento de combustible, mientras que L/100km es una unidad de consumo de combustible por unidad de distancia fija, el aumento del valor representa importante el consumo de combustible.

Para este trabajo de grado, se eligió el consumo como unidad de distancia por cantidad fija de combustible.

1.5.2 Etiquetado de vehículos

El etiquetado es una herramienta informativa que permite conocer la cantidad de energía que consume y los gases nocivos que emite un vehículo, para fomentar hábitos más respetuosos con el ambiente [17]. La etiqueta está enfocada en transporte de uso intensivo de energía: automóviles, vehículos comerciales livianos y camiones. Se trata de un medio visual que establece niveles de eficiencia identificados como A, B, C y D (A es el más eficiente y D el menos eficiente). Los factores considerados para clasificar a un vehículo en una u otra categoría son: hidrocarburos no combustionados (HC), monóxido de carbono (CO), oxígeno (O₂), óxido de nitrógeno (NO_x) y el rendimiento de combustible. Los estándares de

eficiencia deben revisarse y actualizarse regularmente tanto para vehículos nuevos como para los existentes. Con el etiquetado pueden promover la innovación tecnológica en combinación con incentivos y esquemas impositivos que tengan influencia en los procesos de toma de decisiones y aceleren la adopción de vehículos eficientes.

CAPÍTULO 2: MEDICIÓN CONSUMO DE COMBUSTIBLE

En este capítulo se presenta los métodos de medición para los vehículos livianos, tales como; el método del balance de carbón, el gravimétrico y el volumétrico. De los tres, el del balance de carbón es el más utilizado porque permite realizar la medición de consumo y de contaminantes al mismo tiempo, pero sus necesidades elevadas en recursos tecnológicos y de infraestructura no permite usarlo en el caso de este trabajo de grado. Por lo tanto, se realizan pruebas con el método gravimétrico y volumétrico.

2.1 MÉTODOS DE MEDICIÓN

Desde las primeras crisis petroleras de los años 70 y el aumento sin parada del precio de los combustibles fósiles, se desarrollaron normas para la medición consumo de combustible como la CFR 40 [18][19] de los Estados Unidos, la NBR 7024 de Brasil [9] o el reglamento 83 de la UNECE [20]. Estas normas presentan metodologías que sirven para definir un estándar de medición en vez de comparar el consumo y las emisiones de los vehículos livianos. Gracias a estas metodologías se puede, clasificar los vehículos según sus eficiencias energéticas y definir niveles de contaminación. Entonces, los consumidores pueden también elegir sus vehículos por su carácter ambiental y los estados pueden definir legislaciones para incitar la compra de aquellos que contaminen y consuman menos.

En Colombia, las normas de medición consumo de combustible se apoyan sobre la CFR 40 de Estados Unidos y el Reglamento número 83 de la UNECE[20]. Dentro de la CFR 40 existen dos regulaciones, la 1065 y la 1066 que rigen los métodos de medición consumo de combustible [18] [19]. Estas regulaciones sirven para definir los tres métodos de medición siguientes.

2.1.1 Método gravimétrico

El método gravimétrico consiste en medir la variación de masa del tanque para determinar el volumen de combustible consumido durante una prueba. Se mide el peso de combustible en un tanque de suministro. El combustible fluye desde el tanque de suministro, a través de un filtro a gasolina, de una bomba y de un regulador de presión, al motor y el cambio de peso resultante del tanque es el consumo de combustible medido [21].

Metodología:

- Llenar el tanque de combustible
- Conectar el tanque con el motor del vehículo
- Medir la masa del tanque llenado con el combustible con la balanza
- Vigilar los parámetros atmosféricos con el barómetro, termómetro y captor de humedad durante toda la prueba

- Realizar la prueba según el ciclo de conducción elegido
- Evaluar la distancia recorrida
- Medir la masa del tanque al fin de la prueba
- Calcular el volumen de combustible consumido durante la prueba

El volumen de combustible consumido se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$V_{consumido} = \frac{m_{inicial}}{\rho(T, P, h)_{inicial}} - \frac{m_{final}}{\rho(T, P, h)_{final}}$$

ecuación 1: volumen gravimétrico

2.1.2 Método volumétrico

Existen dos tipos de medición volumétrica para el consumo de combustible. La primera es una medida directa del flujo de combustible gracias a un flujometro. El dispositivo registra el flujo promedio de combustible cada segundo o más dependiendo la necesidad de precisión en la medida. Se requiere una estimación de la densidad del combustible, que a menudo se basa en los datos de los proveedores de combustible y la medición de la temperatura del combustible para compensar el efecto de los parámetros ambientales [21].

La segunda es con el OBDII conectado a la ECU del vehículo. La señal de demanda de combustible de la ECU puede usarse como una estimación de consumo de combustible. Dependiendo de la estrategia del motor, pueden ser necesarias estimaciones de densidad posteriores. Esta señal no es una medida sino una señal de demanda y requiere calibración para cada motor en particular para producir resultados precisos. Sin embargo, los datos de la ECU son buenos para evaluar la repetibilidad y está disponible de forma cíclica, lo que permite un análisis en profundidad, especialmente durante eventos transitorios [21].

Metodología

- Llenar el tanque de combustible
- Conectar el medidor entre el filtro del tanque y el motor del vehículo o el OBDII sobre la ECU
- Realizar la prueba según el ciclo de conducción elegido
- Evaluar la distancia recorrida con el medidor y el carro
- Obtener el consumo promedio por medio del medidor
- Calcular el volumen de combustible consumido durante la prueba
- Comparar los dos consumos obtenidos

Como el flujo registrado es por segundo, se puede interpretar como una medida discreta, entonces el volumen de combustible consumido se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$V_{consumido} = \sum_{i=0}^{i=t_{final}-1} Q(i)$$

ecuación 2: volumen volumétrico

2.1.3 Método del balance de carbono

Este método es el más utilizado porque permite realizar la medición del consumo de combustible y de las emisiones de los gases de escape [21]. Pero se necesita un equipo de análisis de 3 gases para los hidrocarburos (HC), el monóxido de carbono (CO) y el dióxido de carbono (CO₂). También existen versiones que analizan los óxidos de nitrógeno (NO_x) y el oxígeno (O₂). La medición del consumo no es directa, se deduce mediante el análisis de la composición de los gases de escape del vehículo. El análisis es dinámico, es decir que se recolectan los gases durante toda la duración de la prueba.

Los analizadores tradicionales miden CO por detector de infrarrojos en un rango 0-10% que es relevante para motores antiguos que tienen una concentración alta en CO. Pero los nuevos motores tienen niveles más bajos de CO, y una concentración tan baja puede no ser visible. Entonces se desarrollaron modelos con sensores electroquímicos para la detección de CO en ppm [22].

Tradicionalmente, se utiliza la detección por infrarrojos para CO, CO₂ y HC. En cuanto O₂, NO, NO₂ y CO en bajas concentraciones se detectan con sensores electroquímicos[23].

La mayor ventaja de este método es que se realizan la medición del consumo de combustible y de las emisiones de contaminantes con un solo equipo y simultáneamente durante las pruebas. No se eligió utilizar este método por razón de su alto costo de adquisición.

Metodología

- Instalar la sonda de tubo de cola en el escape del vehículo
- Conectar la manguera de muestreo al analizador
- Realizar la prueba según el ciclo de conducción elegido
- Evaluar la distancia recogida
- Calcular el consumo de Combustible

Con la composición de los gases de escape recolectados durante la prueba y con un analizador de 3 gases de escape, se puede deducir el consumo de combustible en L/100km para un vehículo a gasolina con la siguiente ecuación [9]:

$$C = \frac{0.8656 * m_{HC} + 0.4288 * m_{CO} + 0.2729 * m_{CO2}}{6.4487 * \%V_{gas} + 4.1102 * \%V_e}$$

ecuación 3: consumo con el balance de carbono

donde,

m_{HC} : masa de hidrocarburos (g/km)

m_{CO} : masa de monóxido de carbono (g/km)

m_{CO2} : masa de dióxido de carbono (g/km)

$\%V_{gas}$: porcentaje de gasolina del combustible

$\%V_e$: porcentaje de etanol en el combustible

2.2 PROCEDIMIENTO DE PRUEBA PARA MÉTODOS GRAVIMÉTRICO Y VOLUMÉTRICO

Los métodos de medición consumo de combustible permiten evaluar el rendimiento de vehículos, pero no sirven sin ciclo de conducción estandarizado. El objetivo de la medición es de calificar los vehículos según su eficiencia energética para informar los consumidores y definir normativas ambientales. La prueba de laboratorio consiste en la simulación de un trayecto en área urbana y extraurbana sobre un dinamómetro de chasis, su definición sigue la norma CFR40 de Estados Unidos [18][19] o el Reglamento número 83 de la UNECE [20] y el segundo es de ruta y consiste en un recorrido establecido según las recomendaciones de la normas como la NBR 7024 de Brasil [9] o la norma 3331 de Chile [24].

Antes de realizar las pruebas se debe seguir un procedimiento para asegurar que los resultados de pruebas sean veraces y precisos.

2.2.1 Prueba de laboratorio

Se realizan para tener una base de comparación entre todos los vehículos porque los parámetros del ensayo se pueden controlar en laboratorio con más precisión que en ruta, pero tienen poca relación con el consumo real de los vehículos. El procedimiento de prueba está inspirado de las normas CFR40 y del Reglamento 83, con adaptación del Laboratorio de Pruebas Dinámicas Automotrices [25].

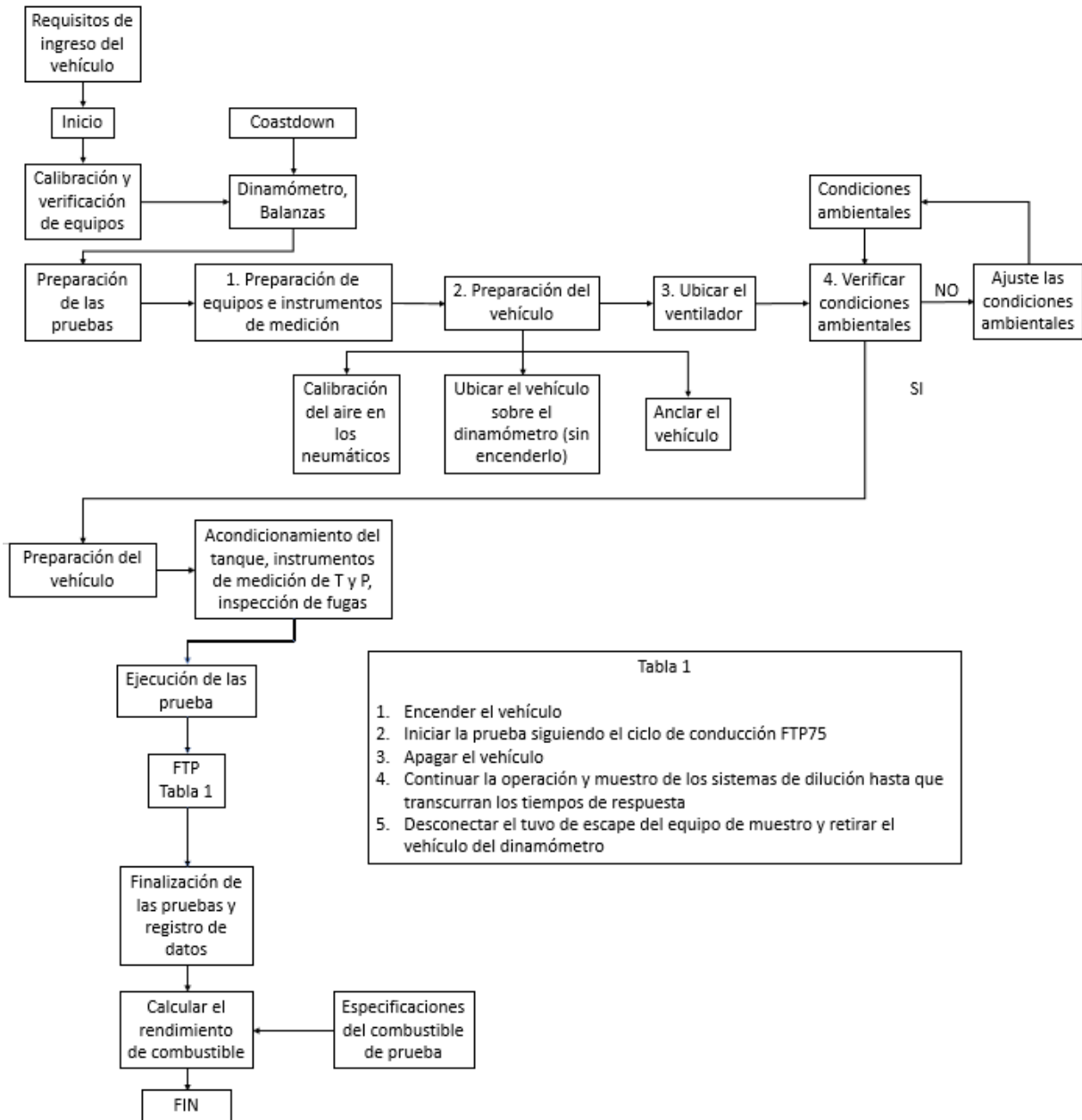


figura 1: procedimiento de laboratorio

2.2.2 Prueba de ruta

Se realizan para tener un rendimiento más cerca de lo real, pero la variabilidad de los parámetros del ensayo es mayor por culpa del tráfico, de los semáforos y del estado de la calzada. El procedimiento de prueba está inspirado de las normas NBR 7024 de Brasil [9] y 3331 de Chile [24], con adaptación del Laboratorio de Pruebas Dinámicas Automotrices [25].

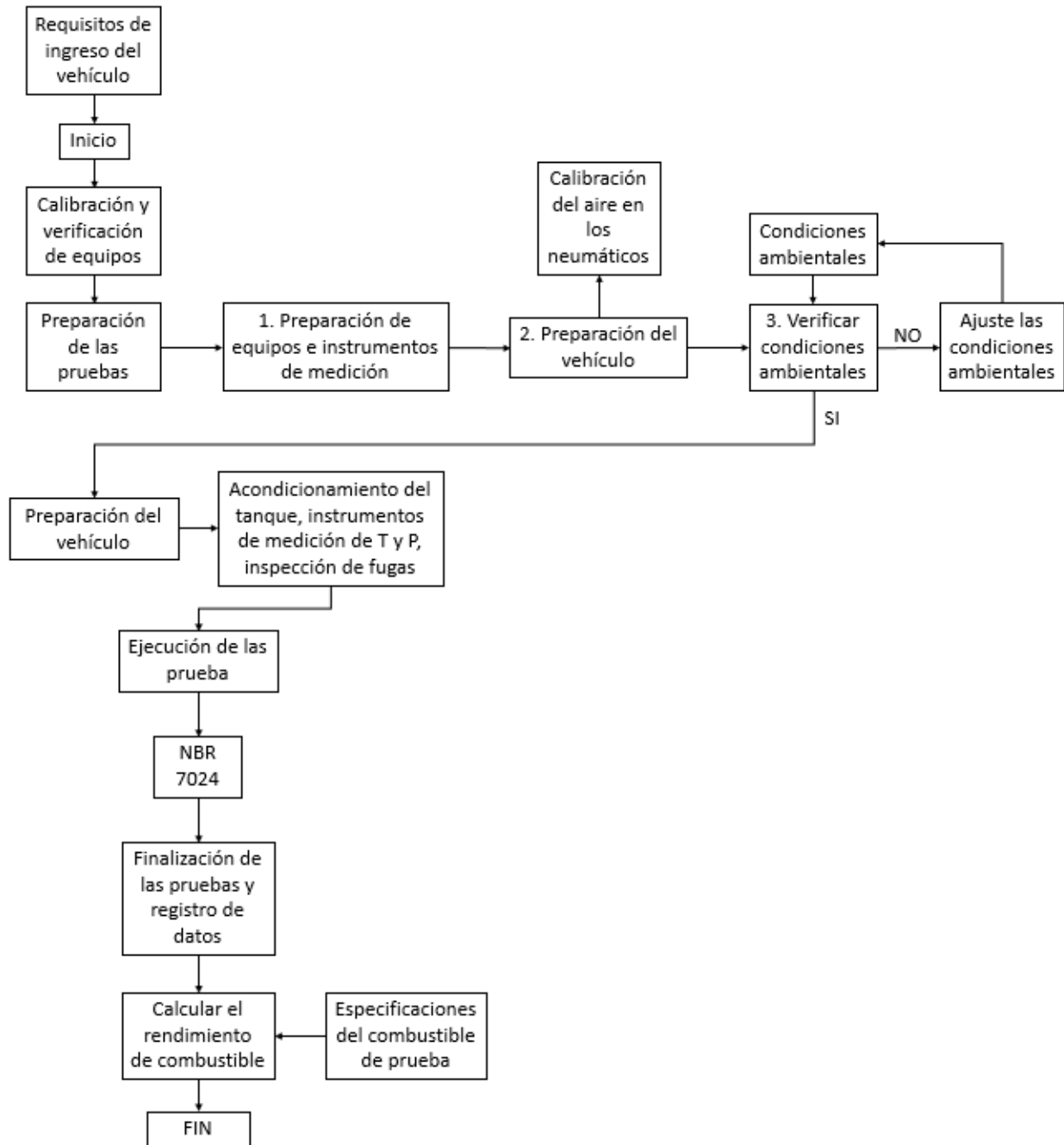


figura 2: procedimiento de ruta

2.3 NORMAS DE CICLOS DE CONDUCCIÓN

Los ciclos de conducción son herramientas para la estandarización de las pruebas de consumo de combustible. Se consideran como el equivalente de un trayecto medio en su país de aplicación. Hoy, existen varias en el mundo que tienen en cuenta las diferencias entre las redes viarias de los países y las reglamentaciones de velocidad [26] [27].

2.3.1 NEDC

El New European Driving Cycle NEDC es un ciclo de conducción que consiste en cuatro ciclos de conducción ECE-15 repetidos y un ciclo de conducción extraurbano, Extra-Urban driving cycle EUDC. Es una prueba diseñada para evaluar objetivamente el impacto medioambiental de los automóviles. Está orientada a informar a los consumidores. Las pruebas se basan en la legislación europea sobre emisiones [24]. Fue creado en 1973 pero actualizado en el 1996 para tener en cuenta los cambios de diseño de los vehículos [28].

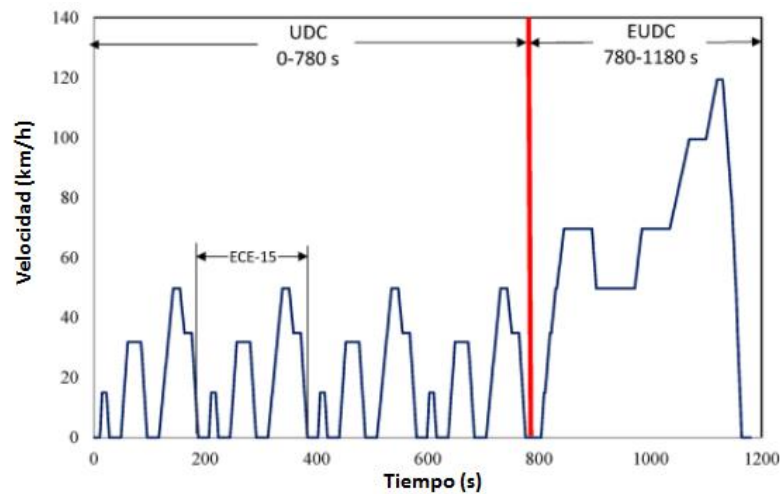


figura 3: perfil NEDC

Duración de la prueba: 1200s
 Distancia: 10,93 km
 Velocidad mediana: 33,35 km/h
 Velocidad máxima: 43,10 km/h

2.3.2 FTP75

El EPA Federal Test Procedure, conocido como FTP-75 para las pruebas de conducción en ciudad, son una serie de exámenes definidos por el US Environmental Protection Agency para la evaluación del consumo y de las emisiones de los vehículos livianos. Fue creado en 1978 pero actualizado en 2008 para tener en cuenta los cambios de diseño de los vehículos [28].

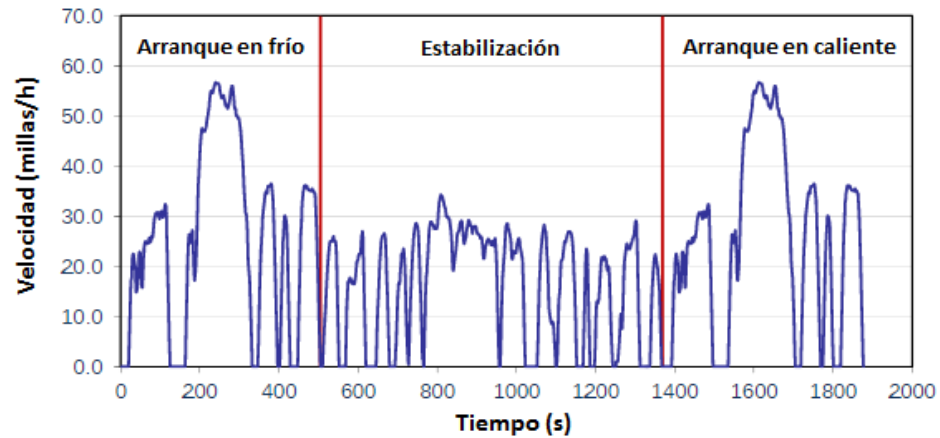


figura 4: perfil FTP-75

Duración de la prueba: 1874s
 Distancia: 17,77km
 Velocidad mediana: 32,4 km/h
 Velocidad máxima: 91,2 km/h

2.3.3 WLTP

La Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedures es un conjunto de pruebas automóviles para determinar los niveles de contaminantes y el consumo de combustible de vehículos livianos de manera más real. Está siendo desarrollado por expertos de las Unión Europea, Japón e India bajo las directrices de la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa. Se utilizará desde septiembre de 2018 para reemplazar los ciclos NEDC [28].

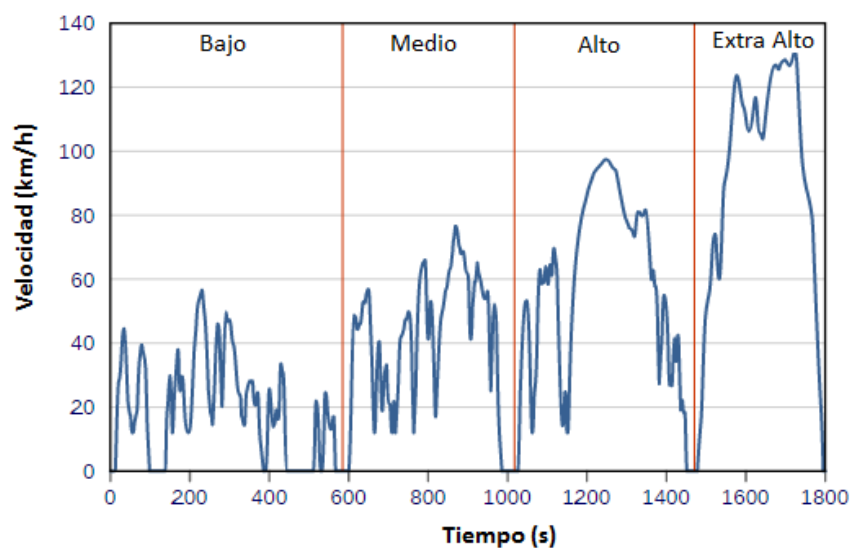


figura 5: perfil WLTC

Duración de la prueba: 1800s
Distancia: 23,26km
Velocidad mediana: 46,3km/h
Velocidad máxima: 131,6 km/h

2.3.5 Ciclo Pereira

Con el fin de presentar un ciclo más próximo de las condiciones reales de conducción en Pereira, se identificó una vía urbana que pasa a través de la ciudad. Este ciclo está adaptado para pruebas de ruta y de laboratorio [29].

La versión de ruta inicia desde el lugar donde se realizan las mediciones, bloque 15 (Laboratorio de Pruebas Dinámicas Automotrices) de la Universidad Tecnológica de Pereira, pasando por la calle 17 rumbo al terminal de transporte, siguiendo por la avenida Las Américas en el tramo comprendido entre el Museo de Arte y Mercasa, se realiza el retorno por la rotonda vía Cartago-Manizales, se devuelve por el mismo tramo, hasta llegar al Centro Comercial la 14, en donde se escoge la vía Armenia y se cruza hacia el túnel de la calle 15, el cual comunica esta vía con el bloque 15 de la Universidad

La versión de laboratorio presenta las características siguientes:

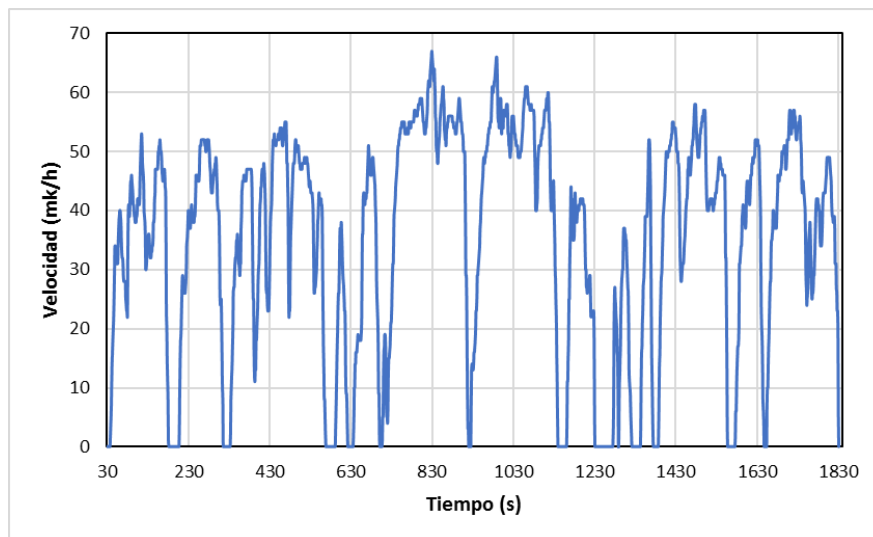


figura 6: perfil Pereira laboratorio

Duración de la prueba: 1800s
Distancia: 17,6km
Velocidad mediana: 34,7km/h
Velocidad máxima: 67,0 km/h

CAPÍTULO 3 COMPARACIÓN DE MÉTODOS

En este capítulo se presenta la metodología y el análisis de los datos de pruebas con el fin de realizar la comparación de métodos. Se desarrolló un modelo de consumo de combustible propio para cada tipo de prueba. Luego, analizando las fuentes de incertidumbre de cada método de medición, se determinó el consumo de combustible de cada prueba y una regresión cuadrática entre los modelos de consumo.

El modelo de consumo de combustible se basa en el definido por el Laboratorio de Pruebas Dinámicas Automotrices [30].

$$C = \frac{\pi * N * d * \rho_c * c_T}{m_c * c_p}$$

ecuación 4: modelo inicial de consumo de combustible

Pero se evaluó que los coeficientes c_T y c_p que son relativos a la dilatación térmica y por presión atmosférica tienen poca influencia sobre el consumo de combustible, por eso no se consideraron [30].

3.1 MÉTODO DE ANÁLISIS DE LOS DATOS

Según el tipo de prueba y el método de medición, el consumo tiene que calcular de manera diferente. En efecto, las variables de interés se obtienen mediante medidas e instrumentos diferentes; por lo tanto, se definió cuatro maneras de evaluar el consumo.

3.1.1 Pruebas de laboratorio

3.1.1.1 Método gravimétrico

Para el cálculo del consumo de combustible durante pruebas de laboratorio y con el método gravimétrico se utilizaron el número de vueltas del dinamómetro, el diámetro del rodillo del dinamómetro, la densidad del combustible y la masa de combustible [30].

$$C = \frac{\pi * N * d * \rho_c}{m_c}$$

ecuación 5: consumo gravimétrico en laboratorio

3.1.1.2 Método volumétrico

Para el cálculo del consumo de combustible durante pruebas de laboratorio y con el método volumétrico se utilizaron el número de vueltas del dinamómetro, el diámetro del rodillo del dinamómetro y el volumen de combustible porque se obtiene directamente el volumen de combustible, entonces $\frac{\rho_c}{m_c}$ se expresa como $\frac{1}{V_c}$ [30].

$$C = \frac{\pi * N * d}{V_c}$$

ecuación 6: consumo volumétrico en laboratorio

3.1.2 Pruebas de ruta

3.1.2.1 Método gravimétrico

Para el cálculo del consumo de combustible durante pruebas de ruta y con el método gravimétrico se utilizaron la distancia recogida, la densidad del combustible y la masa de combustible porque en ruta la distancia recogida se obtiene mediante el GPS del OBDII, entonces $\pi * N * d$ se expresa como D [30].

$$C = \frac{\rho_c * D}{m_c}$$

ecuación 7: consumo gravimétrico en ruta

3.2.1.2 Método volumétrico

Para el cálculo del consumo de combustible durante pruebas de laboratorio y con el método volumétrico se utilizaron la distancia recogida y el volumen de combustible [30].

$$C = \frac{D}{V_c}$$

ecuación 8: consumo volumétrico en ruta

3.2 MÉTODO DE ANÁLISIS DE LA INCERTIDUMBRE

La obtención del valor del consumo de combustible C no es directa. Según el tipo de prueba y el método de medición, el valor de C se obtiene mediante parámetros tal como el número de vueltas del rodillo del dinamómetro N , el diámetro del rodillo d , la densidad del combustible ρ_c , la masa de combustible m_c , el volumen de combustible V_c , la distancia recogida D . En el modelo analítico de consumo de combustible, no se identifica correlación entre las variables que lo definen, lo que significa que existe independencia entre ellas [31]. Se presenta la varianza combinada del mesurando [30].

$$u^2(y) = \sum_{j=1}^N \left[\left(\frac{\partial Y}{\partial x_i} \right) u(x_i) \right]^2 + u_r^2$$

ecuación 9: varianza combinada

donde,

$u^2(y)$: Varianza combinada,

$\frac{\partial Y}{\partial x_i}$: Coeficientes de sensibilidad,

$u(x_i)$: Incertidumbre estimada asociada a cada entrada x_i ,

u_r^2 : Varianza estimada por repetibilidad,

Y : Mensurando. Para el caso de estudio $Y = C$ y es igual al consumo de combustible,

y : Consumo de combustible, asociado al modelo analítico.

En nuestro caso hay cuatro maneras de calcular el consumo de combustible, según el tipo de prueba y el método de medición. Por eso, se necesita definir una varianza combinada para cada método de medición y tipo de prueba.

3.2.1 Pruebas de laboratorio

Las pruebas de laboratorio se caracterizan por su facilidad de control de los parámetros de prueba. El ciclo de conducción está definido antes, y su seguimiento casi es igual durante cada repetición. Sin embargo, siguen existiendo variaciones entre las mediciones, y por eso se necesita definir una varianza combinada.

3.2.1.1 Método gravimétrico

El consumo definido por las pruebas de laboratorio con medición mediante el método gravimétrico da la siguiente expresión para la varianza combinada. Se deduce mediante la utilización de las ecuaciones 5 y 9:

$$u_c^2(c) = \left[\left(\frac{\partial C}{\partial N} \right) u(N) \right]^2 + \left[\left(\frac{\partial C}{\partial d} \right) u(d) \right]^2 + \left[\left(\frac{\partial C}{\partial \rho_c} \right) u(\rho_c) \right]^2 + \left[\left(\frac{\partial C}{\partial m_c} \right) u(m_c) \right]^2 + u_r^2$$

ecuación 10: varianza combinada gravimétrica en laboratorio

3.2.1.2 Método volumétrico

El consumo definido por las pruebas de laboratorio con medición mediante el método volumétrico da la siguiente expresión para la varianza combinada. Se deduce mediante la utilización de las ecuaciones 6 y 9:

$$u_c^2(c) = \left[\left(\frac{\partial C}{\partial N} \right) u(N) \right]^2 + \left[\left(\frac{\partial C}{\partial d} \right) u(d) \right]^2 + \left[\left(\frac{\partial C}{\partial V_c} \right) u(V_c) \right]^2 + u_r^2$$

ecuación 11: varianza combinada volumétrica en laboratorio

3.2.2 Pruebas de ruta

Las pruebas de ruta se caracterizan por su alta variabilidad de realización. De hecho, no se pueden controlar parámetros como el tráfico durante la ejecución de la prueba, lo que influye mucho sobre el estilo de conducción y además el consumo de combustible.

3.2.2.1 Método gravimétrico

El consumo definido por las pruebas de ruta con medición mediante el método gravimétrico da la siguiente expresión para la varianza combinada. Se deduce mediante la utilización de las ecuaciones 7 y 9:

$$u_c^2(c) = \left[\left(\frac{\partial C}{\partial D} \right) u(D) \right]^2 + \left[\left(\frac{\partial C}{\partial \rho_c} \right) u(\rho_c) \right]^2 + \left[\left(\frac{\partial C}{\partial m_c} \right) u(m_c) \right]^2 + u_r^2$$

ecuación 12: varianza combinada gravimétrica en ruta

3.2.2.2 Método volumétrico

El consumo definido por las pruebas de laboratorio con medición mediante el método volumétrico da la siguiente expresión para la varianza combinada. Se deduce mediante la utilización de las ecuaciones 8 y 9:

$$u_c^2(c) = \left[\left(\frac{\partial C}{\partial D} \right) u(D) \right]^2 + \left[\left(\frac{\partial C}{\partial V_c} \right) u(V_c) \right]^2 + u_r^2$$

ecuación 13: varianza combinada volumétrica en ruta

3.2.3 Coeficientes de sensibilidad

Los coeficientes de sensibilidad permiten evaluar la incidencia de cada parámetro involucrado en el cálculo del consumo de combustible de las pruebas. Indica la variación que puede ocurrir en el resultado final, pero se necesita también el valor de la incertidumbre asociada a cada entrada porque algunos parámetros tienen una sensibilidad elevada que se compensa con su alta precisión de medición.

Siguiendo la metodología de medición elegida, los coeficientes se expresan de la manera siguiente dependiendo de la expresión del consumo de combustible y de las variables involucradas:

$$\frac{\partial C}{\partial N} = \frac{\pi * d * \rho_c}{m_c} = \frac{\pi * d}{V_c}$$

ecuación 14: coeficiente de vueltas

$$\frac{\partial C}{\partial d} = \frac{\pi * N * \rho_c}{m_c} = \frac{\pi * N}{V_c}$$

ecuación 15: coeficiente de diámetro

$$\frac{\partial C}{\partial \rho_c} = \frac{\pi * N * d}{m_c} = \frac{D}{m_c}$$

ecuación 16: coeficiente de densidad

$$\frac{\partial C}{\partial m_c} = -\frac{\pi * N * d * \rho_c}{m_c^2} = -\frac{\rho_c * D}{m_c^2}$$

ecuación 17: coeficiente de masa

$$\frac{\partial C}{\partial V_c} = -\frac{\pi * N * d}{V_c^2} = -\frac{D}{V_c^2}$$

ecuación 18: coeficiente de volumen

$$\frac{\partial C}{\partial D} = \frac{\rho_c}{m_c} = \frac{1}{V_c}$$

ecuación 19: coeficiente de distancia

donde,

C: consumo del vehículo (km/L)

N: número de vueltas del rodillo del dinamómetro

d: diámetro del rodillo (m)

ρ_c : densidad del combustible (kg/m³)

m_c : masa de combustible (kg)

V_c : volumen de combustible (L)

D: distancia recogida (km)

3.2.4 Incertidumbre estimada asociada a cada entrada

La medida de cada variable no es exacta, y se tiene un error que depende de la tecnología del medio de medición y de su lectura [32].

Para la medición de variables con aparato digital se define:

$$u(x_i) = \frac{\text{resolucion de lectura}}{2\sqrt{3}}$$

ecuación 20: resolución digital

Las variables consideradas son el número de vueltas del dinamómetro, la masa de combustible y el volumen de combustible y la distancia recogida según el GPS.

Para la medición de variables con instrumento físico se define:

$$u(x_i) = \frac{\frac{1}{2} graduacion}{\sqrt{3}}$$

ecuación 21: resolución física

Las variables consideradas son el diámetro del rodillo del dinamómetro y la densidad del combustible.

3.2.5 Varianza estimada por repetibilidad

Otro parámetro que influye sobre la exactitud de la medición es la repetibilidad de la medición [31]. La varianza estimada por repetibilidad cuantifica el efecto de las repeticiones de las pruebas sobre la incertidumbre. Se supone que su valor baja cuando se aumenta el número de pruebas. Se define la varianza estimada por repetibilidad de la manera siguiente:

$$u_r^2 = \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{(C - \bar{C})^2}{n - 1}}$$

ecuación 22: varianza estimada por repetibilidad

Donde \bar{C} es el promedio de consumo de las pruebas consideradas, y n el número de repeticiones de la prueba.

3.2.6 Incertidumbre expandida

Se determinó una incertidumbre expandida para las mediciones con el fin de obtener un rango de consumo de combustible con un nivel de confianza determinado. El intervalo de confianza para el cálculo de consumo de combustible basado en la metodología de pruebas propuesta se expresa mediante:

$$c - U(C) \leq C \leq c + U(C)$$

ecuación 23: intervalo de confianza

donde, $U(C)$ es la incertidumbre expandida que se expresa de la manera siguiente:

$$U(C) = k \cdot u(C)$$

ecuación 24: incertidumbre expandida

Siendo k el factor de cobertura y $u(C)$ la incertidumbre combinada estimada para el consumo de combustible. El factor de cobertura k es igual a 2, con el cual se obtiene un nivel de confianza de aproximadamente un 95% para la distribución normal de probabilidades [31].

3.2.7 Coeficiente de variación CV

Con el fin de realizar una validación de los resultados, se tiene que evaluar también el coeficiente de variación CV. Se define como la relación entre la desviación estándar con el promedio de la totalidad de las medidas según la ecuación siguiente:

$$\%CV = \frac{S}{X} * 100$$

ecuación 25: coeficiente de variación

Donde S es la desviación estándar del consumo de combustible y X el promedio de la totalidad de las mediciones del consumo de combustible.

Un coeficiente de variación cuyo valor es menor al 10% valida los resultados de prueba [31].

3.3 ANÁLISIS DE DATOS Y DE LA INCERTIDUMBRE

Después de definir una metodología para la medición consumo de combustible, se probó esa metodología sobre casos reales, que son los ciclos de conducción, con el fin de comparar la veracidad y la exactitud de cada medición. Se realizó el análisis de los datos y de la incertidumbre siguiendo la metodología propuesta.

3.3.1 Ciclo FTP-75

3.3.1.1 Método gravimétrico

Se ejecutaron varias pruebas para asegurarse de la veracidad y de la exactitud del cálculo del consumo de combustible. La medición del consumo de combustible del vehículo sobre el ciclo FTP-75 con el método gravimétrico permitió obtener los datos siguientes.

Ensayo	Nrodillo	ρ_{comb} (kg/m ³)	Mcomb (kg)	C (km/L)
1	24860	736	0,905	13,764
2	24858	736	0,890	14,003
3	24838	734	0,922	13,469
4	24833	736	0,870	14,310
5	25008	733	0,904	13,812
6	24822	736	0,924	13,467
7	24962	734	0,903	13,813
8	25054	737	0,924	13,612

tabla 1: datos gravimétricos FTP-75

Con la tabla anterior se pudo realizar los siguientes cálculos.

Cmedio	13,689	km/L
Ur ²	0,089	
Uc ²	1,56E-05	
U	0,299	km/L
CV	1,485	%

tabla 2: resultados gravimétricos FTP-75

Así, se obtuvo el consumo siguiente, con un coeficiente de variación del 1.485%. Este valor inferior al 10%, indica que se pueden validar los resultados de medición.

$$13.390 \text{ km/L} \leq C \leq 13.988 \text{ km/L}$$

Se puede notar que la influencia de los aparatos de medición sobre el resultado es muy baja porque la varianza por medición está más de mil veces menor que la varianza estimada por repetibilidad. Eso quiere decir que la medición del consumo de combustible se hace bajo métodos confiables.

3.3.1.2 Método volumétrico

La medición del consumo de combustible del vehículo sobre el ciclo FTP-75 con el método volumétrico permitió obtener los datos siguientes. Se ejecutaron varias pruebas para asegurarse de la veracidad y de la exactitud del cálculo del consumo de combustible.

Ensayo	D (km)	VobdII (ml)	C (km/L)
1	16,470	1409,761	11,683
2	16,466	1358,185	12,124
3	16,419	1290,423	12,724
4	16,558	1333,295	12,418
5	16,561	1318,261	12,563
6	16,340	1302,795	12,542
7	16,557	1355,273	12,217
8	16,547	1335,529	12,390
9	16,620	1381,052	12,034

tabla 3: datos volumétricos FTP-75

Con la tabla anterior se pudo realizar los siguientes cálculos.

Cmedio	12,299	km/L
Ur ²	0,102	
Uc ²	2,86E-06	
U	0,320	km/L
CV	2,059	%

tabla 4: resultados volumétricos FTP-75

Así, se obtuvo el consumo siguiente, con un coeficiente de variación del 2.059%. Este valor inferior al 10%, indica que se pueden validar los resultados de medición.

$$11.979 \text{ km/L} \leq C \leq 12.619 \text{ km/L}$$

3.3.2 Ciclo WLTC

3.3.2.1 Método gravimétrico

La medición del consumo de combustible del vehículo sobre el ciclo WLTC con el método gravimétrico permitió obtener los datos siguientes. Se ejecutaron varias pruebas para asegurarse de la veracidad y de la exactitud del cálculo del consumo de combustible.

Ensayo	Nrodillo	ρ_{comb} (kg/m ³)	Mcomb (kg)	C (km/L)
1	32365	734	1,044	15,498
2	32643	733	1,107	14,715
3	32711	733	1,153	14,163
4	32391	733	1,061	15,234
5	32524	735	1,070	15,217
6	32424	734	1,061	15,271
7	33106	734	1,074	15,403

tabla 5: datos gravimétricos WLTC

Con la tabla anterior se pudo realizar los siguientes cálculos.

Cmedio	14,852	km/L
Ur ²	0,238	
Uc ²	1,69E-05	
U	0,488	km/L
CV	2,434	%

tabla 6: resultados gravimétricos WLTC

Así, se obtuvo el consumo siguiente, con un coeficiente de variación del 2.434%. Este valor inferior al 10%, indica que se pueden validar los resultados de medición.

$$14.364 \text{ km/L} \leq C \leq 15.340 \text{ km/L}$$

3.3.2.2 Método volumétrico

La medición del consumo de combustible del vehículo sobre el ciclo WLTC con el método volumétrico permitió obtener los datos siguientes. Se ejecutaron varias pruebas para asegurarse de la veracidad y de la exactitud del cálculo del consumo de combustible.

Ensayo	D (km)	VobdII (ml)	C (km/L)
1	21,129	1518,604	13,913
2	21,655	1579,846	13,707
3	21,477	1453,865	14,772
4	21,595	1636,686	13,194
5	21,476	1533,428	14,005
6	21,591	1549,297	13,936
7	21,522	1531,387	14,054
8	21,444	1582,003	13,555

tabla 7: datos volumétricos WLTC

Con la tabla anterior se pudo realizar los siguientes cálculos.

Cmedio	13,892	km/L
Ur ²	0,207	
Uc ²	3,67E-06	
U	0,455	km/L
CV	2,195	%

tabla 8: resultados volumétricos WLTC

Así, se obtuvo el consumo siguiente, con un coeficiente de variación del 2.195%. Este valor inferior al 10%, indica que se pueden validar los resultados de medición.

$$13.437 \text{ km/L} \leq C \leq 14.347 \text{ km/L}$$

3.3.3 Ciclo Pereira en laboratorio

3.3.3.1 Método gravimétrico

La medición del consumo de combustible del vehículo sobre el ciclo Pereira con el método gravimétrico permitió obtener los datos siguientes. Se ejecutaron varias pruebas para asegurarse de la veracidad y de la exactitud del cálculo del consumo de combustible.

Ensayo	Nrodillo	pcomb (kg/m3)	Mcomb (g)	C (km/L)
1	26541	736	1,005	13,239
2	26623	735	0,976	13,656
3	26734	734	0,989	13,507
4	26582	734	0,933	14,244
5	26612	733	0,960	13,833

tabla 9: datos gravimétricos Pereira en laboratorio

Con la tabla anterior se pudo realizar los siguientes cálculos.

Cmedio	13,696	km/L
Ur ²	0,141	
Uc ²	0,000	
U	0,376	km/L
CV	2,002	%

tabla 10: resultados gravimétricos Pereira en laboratorio

Así, se obtuvo el consumo siguiente, con un coeficiente de variación del 2.002% . Este valor inferior al 10%, indica que se pueden validar los resultados de medición.

$$13.320 \text{ km/L} \leq C \leq 14.072 \text{ km/L}$$

3.3.3.2 Método volumétrico

La medición del consumo de combustible del vehículo sobre el ciclo Pereira con el método volumétrico permitió obtener los datos siguientes. Se ejecutaron varias pruebas para asegurarse de la veracidad y de la exactitud del cálculo del consumo de combustible.

Ensayo	D (km)	VobdII (ml)	C (km/L)
1	17,671	1431,279	12,346
2	17,720	1433,652	12,360
3	17,603	1369,553	12,853
4	17,655	1419,406	12,438

tabla 11: datos volumétricos Pereira en laboratorio

Con la tabla anterior se pudo realizar los siguientes cálculos.

Cmedio	12,424	km/L
Ur ²	0,072	
Uc ²	2,91E-06	
U	0,268	km/L
CV	1,428	%

tabla 12: resultados volumétricos Pereira en laboratorio

Así, se obtuvo el consumo siguiente, con un coeficiente de variación del 1.428% .

$$12.156 \text{ km/L} \leq C \leq 12.692 \text{ km/L}$$

3.3.4 Ciclo Pereira en ruta

3.3.4.1 Método gravimétrico

La medición del consumo de combustible del vehículo sobre el ciclo Pereira con el método gravimétrico permitió obtener los datos siguientes.

Se ejecutaron varias pruebas para asegurarse la veracidad y de la exactitud del cálculo del consumo de combustible. Además, se realizaron las pruebas en horarios de mayor tráfico, porque es lo más representativo de las costumbres de desplazamiento de las personas.

hora	Ensayo	ρ_{comb} (kg/m ³)	Mcomb (kg)	C (km/L)	D (km)
14h45	1	734	1,46	11,295	22,466
7h00	2	736	1,58	10,401	22,328
12h00	3	734	1,51	10,937	22,499
7h00	4	736	1,48	11,207	22,537
12h00	5	735	1,48	11,100	22,352
7h00	6	736	1,59	10,397	22,461
12h00	7	734	1,56	10,578	22,481

tabla 13: datos gravimétricos Pereira en ruta

Con la tabla anterior se pudo realizar los siguientes cálculos.

Cmedio	10,845 km/L
U _r ²	0,146
U _c ²	4,87E-07
U	0,382 km/L
CV	5,407 %

tabla 14: resultados gravimétricos Pereira en ruta

Así, se obtuvo el consumo siguiente, con un coeficiente de variación del 5.407%. Este valor inferior al 10%, indica que se pueden validar los resultados de medición.

$$10.463 \text{ km/L} \leq C \leq 11.227 \text{ km/L}$$

3.3.4.2 Método volumétrico

La medición del consumo de combustible del vehículo sobre el ciclo FTP-75 con el método volumétrico permitió obtener los datos siguientes. Se ejecutaron varias pruebas para asegurarse de la veracidad y de la exactitud del cálculo del consumo de combustible. Además, se realizaron las pruebas en horarios de mayor tráfico, porque es lo más representativo de las costumbres de desplazamiento de las personas.

hora	Ensayo	D (km)	VobdII (ml)	C (km/l)
14h45	1	22,466	2139,200	10,502
7h00	2	22,328	2295,032	9,729
12h00	3	22,499	2266,330	9,928
7h00	4	22,537	2122,994	10,616
12h00	5	22,352	2206,395	10,130
7h00	6	22,461	2176,15089	10,322
12h00	7	22,481	2252,688	9,980

tabla 15: datos volumétricos Pereira en ruta

Con la tabla anterior se pudo realizar los siguientes cálculos.

Cmedio	10,172	km/L
Ur ²	0,104	
Uc ²	3,44E-07	
U	0,322	km/L
CV	2,591	%

tabla 16: resultados volumétricos Pereira en ruta

Así, se obtuvo el consumo siguiente, con un coeficiente de variación del 2.591% . Este valor inferior al 10%, indica que se pueden validar los resultados de medición.

$$9.850 \text{ km/L} \leq C \leq 10.494 \text{ km/L}$$

3.4 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Con el fin de definir la metodología de medición consumo de combustible, se compararon los resultados obtenidos entre los métodos de medición, los procedimientos de prueba y los ciclos de conducción en la tabla siguiente:

Ciclo	Metodo	Cmin (km/L)	Cmedio (km/L)	Cmax (km/L)	CV (%)
FTP-75	gravimetrico	13,4	13,7	14,0	1,5
	volumetrico	12,0	12,3	12,6	2,1
WLTC	gravimetrico	14,4	14,9	15,3	2,4
	volumetrico	13,4	13,9	14,3	2,2
Pereira laboratorio	gravimetrico	13,3	13,7	14,1	2,0
	volumetrico	12,2	12,4	12,7	1,4
Pereira ruta	gravimetrico	10,5	10,8	11,2	5,4
	volumetrico	9,9	10,2	10,5	2,6

tabla 17: consumo y coeficiente de variación de las pruebas

3.4.1 Métodos de medición

Los métodos de medición consumo de combustible aplicados a los ciclos de prueba tienen un coeficiente de variación entre el 1.4% y el 2.6% sin tener en cuenta el método gravimétrico aplicado al ciclo Pereira en ruta que tiene un coeficiente de variación del 5.4%. Eso confirma los resultados de rangos que son similares respecto a la magnitud del consumo promedio porque el valor del coeficiente de variación es inferior al 10% [31].

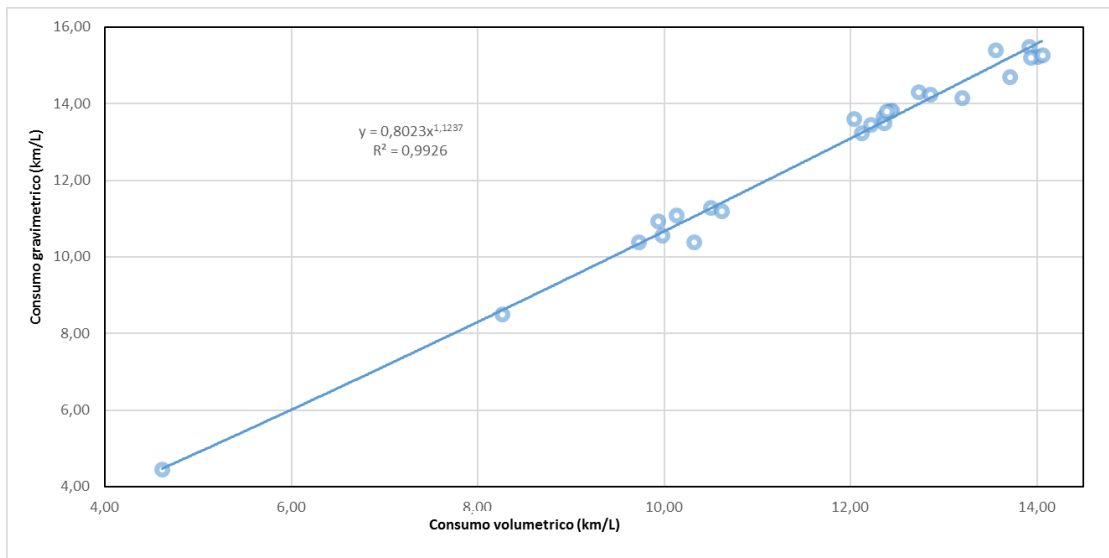
Pero se nota una diferencia entre los consumos medios que varía entre el 5 y el 10%. De hecho, el método volumétrico siempre da un valor de consumo menor que el del gravimétrico por culpa de una sobrevaluación del flujo de combustible inyectado según los cálculos de la ECU del vehículo. En efecto, la medición del flujo de combustible no es directa, y viene sólo del valor registrado en la ECU de la calibración de los inyectores del motor del vehículo, de acuerdo con la optimización realizada por el fabricante [21].

A parte de eso, se puede considerar que los resultados del OBDII son confiable [11], porque también se validaron sobre cada tipo de prueba con un coeficiente de variación menor al 10%.

Entonces la exactitud del método gravimétrico es mayor que la del método volumétrico, pero gracias a los datos de todas las pruebas realizadas, se construyó un modelo de regresión cuadrática entre el consumo gravimétrico y volumétrico. Este modelo es definido por la ecuación siguiente:

$$C_{gravimetrico} = 0.8023 * C_{volumetrico}^{1.1237}$$

ecuación 26: relación gravimétrico/volumétrico



gráfica 1: curva de tendencia gravimétrico/volumétrico

El coeficiente de correlación de la regresión cuadrática es del 99.26%, lo que permite considerar que los resultados de un método de medición se pueden deducir de otro con confiabilidad.

3.4.2 Procedimiento de prueba

En este caso, sólo se consideran las pruebas del ciclo Pereira, que son las únicas que se pueden comparar en ruta y en laboratorio. El coeficiente de variación de las pruebas de ruta es mayor que en laboratorio para el método gravimétrico. Durante las mediciones gravimétricas en ruta, la medición de la masa del tanque de suministro se hace antes y después de la realización de la prueba. Es decir que se pesa también el combustible consumido para encender el motor. Este parámetro no entra en cuenta con las pruebas volumétricas o con los ciclos de laboratorio porque se realiza la medición después de encender el motor.

El consumo en laboratorio tiene únicamente valores encima de 12 km/L, en cuanto se nota que, para las pruebas en ruta, el valor no alcanza 11km/L. Se puede explicar la diferencia de consumo por la culpa de parámetros externos al ensayo que son la presencia de otros vehículos sobre la ruta, la presencia de semáforos y el estado de la calzada. Estos parámetros no se pueden controlar y tienen un impacto importante sobre la manera de conducir, lo que afecta directamente el consumo. En efecto, no se puede seguir un perfil de velocidad y de cambios predeterminado como en el caso de pruebas de laboratorio por culpa del tráfico.

3.4.3 Ciclos de conducción

La mayor diferencia que se nota cuando se trata de los ciclos de conducción es el valor promedio del consumo de combustible. Hay una variación del 27.5% del consumo de combustible entre el ciclo Pereira en ruta y el ciclo WLTC con método idéntico. Eso demuestra que la definición del perfil de velocidad y de cambios del ciclo de conducción tiene una influencia enorme sobre los resultados de prueba. Por eso la definición del perfil de velocidades y de cambios del ciclo Pereira tiene sentido porque permite evaluar la eficiencia de los vehículos de acuerdo con la realidad.

Se puede notar que los ciclos FTP-75 y Pereira en laboratorio tienen un consumo de 13.7 km/L con el método gravimétrico, y además consumos respectivos de 12.3 y 12.4 km/L con el método volumétrico lo que indica que los ciclos son comparables. Sin embargo, se nota también que los resultados de consumo del ciclo Pereira en ruta y en laboratorio tienen un 26.85% para el método gravimétrico y 21.56% para el método volumétrico de diferencia lo que demuestra la importancia de realizar pruebas en ruta para tener datos que vienen de un caso real que corresponda más con el consumo en utilización.

CONCLUSIONES

A continuación, se presentan las conclusiones encontradas en la ejecución del proyecto:

- Se identificaron tres tipos de métodos de medición consumo de combustible que son el balance de carbono, el análisis gravimétrico y el análisis volumétrico. Se utilizaron los métodos gravimétricos y volumétricos para las mediciones. El alto costo de implementación del método del balance de carbono y la inexistencia de los equipos en el Laboratorio no permitió compararlo. Se realizó la medición gravimétrica con un tanque de suministro exterior y la medición volumétrica con el ODBII del vehículo.
- Se identificaron varios ciclos de conducción alrededor del mundo, de los cuales se pusieron dos en práctica que son el FTP-75 de Estados Unidos y el WLTC de Europa. Además, se utilizó un ciclo adaptado a la conducción en el área metropolitana de Pereira. Este ciclo se descompone en una versión en laboratorio, igualmente que los ciclos estándares, y una versión de ruta, para obtener resultados más cercanos al real.
- Se realizaron pruebas en laboratorio y ruta con los ciclos elegidos y se recogieron los datos resultantes. Se analizaron los datos de medición consumo de combustible con el fin de determinar cuál medio de medición era lo más adaptado. Se determinó que el método gravimétrico tiene mayor exactitud en la medición. Sin embargo, el valor casi idéntico de los coeficientes de variación indica que los métodos son de igual precisión.
- Se determinó una relación cuadrática entre los valores de consumo obtenidos por la medición de los dos métodos:

$$C_{gravimetrico} = 0.8023 * C_{volumetrico}^{1.1237}$$

- El método gravimétrico tiene mayor exactitud en la medición que el método volumétrico, pero tiene menos posibilidades de implementación. En efecto, se necesita un sistema externo de admisión de combustible hasta el motor porque se utiliza un tanque de suministro externo para el método gravimétrico. De hecho, se necesita una instalación con una bomba, un regulador de presión, un tanque externo, un filtro para gasolina y mangueras para conectar los elementos. En cuanto, la medición con el OBDII sólo necesita adquirir el equipo de transmisión de datos de la ECU a un receptor Bluetooth para recolectar los datos. Entonces, como los dos métodos son de precisión idéntica, y con la relación cuadrática de consumo, se puede utilizar el que conviene más al caso de utilización.
- En el caso de Laboratorio de Pruebas Dinámicas Automotrices, se evalúa el método gravimétrico como lo más adecuado porque tiene mayor exactitud de medición consumo de combustible y ya está implementado. Entonces, permite realizar

mediciones confiables metrológicamente y exactas del consumo de combustible de vehículos livianos sin necesitar una inversión suplementaria.

- La alta variabilidad del consumo de combustible según el ciclo de prueba demuestra la importancia de la elección de un ciclo adaptado a la región de comercialización del vehículo para ser representativo del consumo real.
- La alta variabilidad del consumo de combustible según el tipo de prueba, en ruta o laboratorio, demuestra la importancia de la realización de pruebas en ruta porque los resultados de laboratorio sólo permiten comparar los vehículos entre ellos y no informan el consumidor sobre el consumo real de los vehículos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] EIA, “International Energy Outlook 2017 Overview,” *U.S. Energy Information Administration*, vol. IEO2017, no. 2017, p. 143, 2017.
- [2] M. Ravina, D. Panepinto, and M. C. Zanetti, “DIDEM - An integrated model for comparative health damage costs calculation of air pollution,” *Atmospheric Environment*, vol. 173, pp. 81–95, Jan. 2018.
- [3] Ministerio de ambiente y desarrollo Sostenible, “Resolucion 910 de 2008,” 2014.
- [4] Ministerio de ambiente y desarrollo Sostenible, “Resolucion 1111 de 2013.”
- [5] J. Kim, K. Choi, C. L. Myung, Y. Lee, and S. Park, “Comparative investigation of regulated emissions and nano-particle characteristics of light duty vehicles using various fuels for the FTP-75 and the NEDC mode,” *Fuel*, vol. 106, pp. 335–343, Apr. 2013.
- [6] S. D. Hafner, C. Rennuit, J. M. Triolo, and B. K. Richards, “Validation of a simple gravimetric method for measuring biogas production in laboratory experiments,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 83, pp. 297–301, Dec. 2015.
- [7] M. Zhou, H. Jin, and W. Wang, “A review of vehicle fuel consumption models to evaluate eco-driving and eco-routing,” *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 49, pp. 203–218, Dec. 2016.
- [8] Associação brasileira de normas tecnicas, “ABNT NBR 6601.”
- [9] Associação brasileira de normas tecnicas, “ABNT NBR 7024.”
- [10] P. Mock and J. German, “The future of vehicle emissions testing and compliance,” *International Council on Clean Transportation*, no. November, 2015.
- [11] U.S. Environmental Protection Agency and U.S. Department of Energy, “FUEL ECONOMY GUIDE,” 2016.
- [12] Agencia Chilena de Eficiencia Energética, “Guía de Conducción Eficiente Vehículos particulares,” 2013.
- [13] Government of Cananda, “Fuel consumption ratings search tool - conventional vehicles.” [Online]. Available: http://oee.nrcan.gc.ca/fcr-rcf/public/index-e.cfm?submitted=true&sort=overall_rank&searchbox=&year=2018&class=T&make=ALFA+ROMEO&model=4C+COUPE&trans=all&FT=all&cylinders=all&unit=0&kmPerYear=&cityRating=&fuelGas=&fuelPremium=&fuelDiesel=&onSearchLink=%231. [Accessed: 11-Jun-2018].
- [14] UK legislation, “The Passenger Car (Fuel Consumption and CO2 Emissions Information) Regulations 2001.”
- [15] U.S. Environmental Protection Agency, “Learn More About the Fuel Economy Label for Gasoline Vehicles.” [Online]. Available: <https://www.fueleconomy.gov/feg/label/learn-more-gasoline-label.shtml>. [Accessed:

13-Jun-2018].

- [16] Global Fuel Economy Initiative, “The European Union Automotive Fuel Economy Policy.” [Online]. Available: https://www.globalfueleconomy.org/Transport/GFEI/Autotool/case_studies/europe/cs_eu_0.asp. [Accessed: 14-Jun-2018].
- [17] A. E. Atabani, I. A. Badruddin, S. Mekhilef, and A. S. Silitonga, “A review on global fuel economy standards, labels and technologies in the transportation sector,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 9, pp. 4586–4610, 2011.
- [18] U.S. Environmental Protection Agency, “Code Of Federal Regulations Part 1065—Engine-Testing Procedures.” [Online]. Available: <https://www.ecfr.gov/cgi-bin/retrieveECFR?gp=&SID=f4c253f9277df3fe7e3cf33f78c8c685&mc=true&n=pt40.37.1065&r=PART&ty=HTML>. [Accessed: 12-Jun-2018].
- [19] U.S. Environmental Protection Agency, “Code Of Federal Regulations Part 1066—Vehicle-Testing Procedures.” [Online]. Available: <https://www.ecfr.gov/cgi-bin/textidx?SID=ba447754d6f766672ab21e5aa4146283&mc=true&node=pt40.33.1066&rgn=div5>. [Accessed: 12-Jun-2018].
- [20] Nation Unies, “Additif 82: Règlement No 83 concernant l’adoption de prescriptions techniques uniformes applicables aux véhicules à roues, aux équipements et aux pièces susceptibles d’être montés ou utilisés sur un véhicule à roues et les conditions de reconnaissance réc,” 2011.
- [21] R. D. Burke, C. J. Brace, and J. G. Hawley, “Critical evaluation of on-engine fuel consumption measurement,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, vol. 225, no. 6, pp. 829–844, 2011.
- [22] “NOVA 7466K Portable engine exhaust gas analyzer.” [Online]. Available: http://www.gasdetectorsusa.com/GDUSA/M_product.asp?pid=5804-NOVA_7466K_ENGINE_EXHAUST_PORTABLE&desktop=no. [Accessed: 16-Jun-2018].
- [23] Analizador de gases de escape, “Model 7466k portable engine.”
- [24] Agencia de Eficiencia Energética, “Norma Chilena 3331.” [Online]. Available: <https://www.acee.cl/asesoramiento/interesado-en-certificar/norma-chilena-3331/>. [Accessed: 12-Jun-2018].
- [25] U. T. D. P.-U. Instituto Nacional De Metrología De Colombia – INM, “Desarrollo e implementación de una metodología de medición de consumo energético y de emisiones para vehículos en Colombia: definición de la metodología de pruebas para la medición del consumo energético de los vehículos y sus emisiones de gases de efecto,” 2016.
- [26] K. Blumberg and F. Posada, “Comparison of US and EU programs to control light-duty vehicle emissions,” *The ICCT*, 2015.
- [27] P. Mock, J. Kühlwein, U. Tietge, V. Franco, A. Bandivadekar, and J. German, “The WLTP: How a new test procedure for cars will affect fuel consumption values in the

EU,” *ICCT White Paper*, vol. 2014, no. 9, pp. 1–20, 2014.

- [28] “Why Is Fuel Economy Important.” [Online]. Available: <https://www.fueleconomy.gov/feg/why.shtml>. [Accessed: 27-May-2018].
- [29] B. P. G. de las Heras, “Desarrollo de una metodología para generación de ciclos de conducción representativos del tráfico real urbano. Aplicación para medida de emisiones en banco de rodillos.”
- [30] Instituto Nacional De Metrología De Colombia – INM and Universidad Tecnológica De Pereira - UTP, “Desarrollo e implementación de una metodología de medición de consumo energético y de emisiones para vehículos en Colombia: definición del modelo de estimación de incertidumbre para el cálculo de consumo de combustible,” 2016.
- [31] J. Hipp, C. Hill, and M. Hall, “Evaluación de datos de medición Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida,” *Test*, pp. 309–326, 2007.
- [32] A. Z. T. . G. G. Porras, “Expresión de incertidumbre en la calibración de equipos de medicion de energía eléctrica,” pp. 1–15, 2008.